

**В. В. ОСАДЧИЙ, О. С. НАЗАРОВА, М. О. ОЛЕЙНИКОВ**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗИЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДВОМАСОВОЇ СИСТЕМИ З ВНУТРІШНІМ СЛІДКУЮЧИМ КОНТУРОМ**

Підвищення вимог до швидкодії, точності, плавності, безпеки та енергоємності різноманітних електромеханічних систем обумовлює їх безперервне удосконалення. Метою роботи є розробка та дослідження системи автоматичного керування двомасовим позиційним електроприводом зі слідкующим одномасовим приводом у внутрішньому контурі. Вирішені такі задачі: розроблено математичну та фізичну моделі слідкующего та позиційного електроприводів; синтезовано регулятор положення другої маси; розроблено та досліджено ПІД-регулятор.

**Ключові слова:** двомасова система, позиційний електропривод, ПІД-регулятор, мікроконтролер, математичне моделювання.

**В. В. ОСАДЧИЙ, Е. С. НАЗАРОВА, Н. А. ОЛЕЙНИКОВ**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С ВНУТРЕННИМ СЛЕДЯЩИМ КОНТУРОМ**

Повышение требований к быстродействию, точности, плавности, безопасности и энергоёмкости различных электромеханических систем обуславливает их непрерывное совершенствование. Целью работы является разработка и исследование системы автоматического управления двухмассовым позиционным электроприводом со следящим одномассовым приводом во внутреннем контуре. Решены следующие задачи: разработана математическая и физическая модели следящего и позиционного электроприводов; синтезирован регулятор положения второй массы; разработан и исследован ПИД-регулятор.

**Ключевые слова:** двухмассовая система, позиционный электропривод, ПИД-регулятор, микроконтроллер, математическое моделирование.

**V. V. OSADCHYY, O. S. NAZAROVA, M. O. OLEINIKOV**

### **RESEARCH OF POSITIONAL ELECTRICAL DRIVE OF THE TWO-MASS SYSTEM WITH INTERNAL FOLLOWING CONTOUR**

Increasing the requirements for speed, accuracy, smoothness, safety and energy intensity of various electromechanical systems makes them continuous improvement. The purpose of the work is to develop and research the system of automatic control of a two-axle positioned electric motor with a monotone driven motor in the inner circuit. The following tasks were solved: mathematical and physical models of tracking and positioning electric drives were developed; the regulator of the position of the second mass is synthesized; the work of the PID-regulator has been developed and investigated. The use of a single-mass electric follower tracking in the internal contour of a positional two-axle electric motor allows for simpler control of the regulator and reduces the required computational power during simulation due to the presentation of the follower electric drive by the first-order aperiodic link. The simulation model of a positional drive, the adequacy of which is confirmed by physical experiment, is developed, together with the stand, for the study of closed two-mass systems of electric drive of a direct current with microprocessor control. The controller, synthesized by the classical method, has a low practical value due to the complexity of its implementation, which is due to the high order of the polynomial of the numerator of the transfer function. The use of a mathematical model for searching the PID controller coefficients, providing the desired static and dynamic characteristics, reduces the search time and reduces the risk of damage to real equipment during the debugging process.

**Keywords:** two-mass system, positional electric drive, PID-controller, microcontroller, mathematical modeling.

**Введення.** У промисловості масово використовуються позиційні приводи [1, 2]. До цього класу відносяться промислові крани, ліфти, металорізальні верстати та інші промислові агрегати. Безпека та якість роботи цих механізмів залежить від швидкодії системи, яка потребує постійного вдосконалення та правильної розробки. Це робить актуальним завдання розробки та оптимізації систем електроприводу виконавчих позиційних механізмів. Цьому сприяє використання в системах автоматичного керування ПІД-регуляторів.

ПІД-регулятор відноситься до найбільш поширеного типу регуляторів [3]. Причиною такої великої популярності являється простота побудови та промислового використання, ясність функціонування та придатність для вирішення більшості практичних задач. Тому актуальною задачею є знаходження параметрів ПІД-регулятора, що забезпечать бажані статичні та динамічні характеристики для заданої системи. Особливу роль в цьому відіграє математичне моделювання, адже воно дозволяє детальніше дослідити об'єкт,

процеси, що в ньому протікають, та знайти необхідні коефіцієнти регуляторів, заощаджуючи при цьому, час та витрати на фізичні експерименти.

**Мета роботи.** Розробка та дослідження системи автоматичного керування двомасовим позиційним електроприводом зі слідкующим одномасовим приводом у внутрішньому контурі. Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі: розробка математичної та фізичної моделі слідкующего та позиційного електроприводів; синтез регулятора положення другої маси; розробка та дослідження роботи ПІД-регулятора.

**Матеріали і результати дослідження.** Позиційною системою (ПС) називається замкнута по положенню система керування електроприводом, що призначена для переведення початково-нерухомого виконавчого органу робочого механізму із деякого початкового положення в задане, із зупинкою в кінці переміщення [4].

Традиційно ПС будується на основі триконтурної системи регулювання із зовнішнім контуром положен-

ня і внутрішніми контурами швидкості та струму. Основними вимогами, що пред'являються до позиційних електроприводів, є: точність позиціонування, яка, зазвичай, визначається як смуга відстаней по обидві сторони від заданої позиції, в якій повинен бути зупинений виконавчий орган; стабільність, що оцінюється як повторюваність результатів точності при багаторазовому відпрацюванні одного і того ж заданого переміщення; продуктивність, яка визначається часом відпрацювання заданого переміщення і часом позиціонування; економічність, що визначається мінімумом капітальних і експлуатаційних витрат [5].

Схема підпорядкованого регулювання широко використовується, в першу чергу, в позиційних електроприводах. Її перевагою є автоматизація процесу відпрацювання великих переміщень або кутів повороту вихідної ланки двигуна, що поєднується з простотою налаштування максимальної швидкості та прискорення. З метою спрощення схеми керування позиційним електроприводом, зазвичай, замість регулятора прискорення застосовують регулятор струму якоря, що відносно легко вимірюється і є, в певних умовах, близьким аналогом прискорення [6].

Якщо регулювання частоти обертання двигуна постійного струму повинно виконуватися з підвищеною точністю, наприклад в реверсивних позиційних електроприводах, застосування мікропроцесорів може виявитися особливо ефективним. Фактична частота обертання або відразу перетворюється в частотозалежний сигнал (наприклад, за допомогою датчика імпульсів), або вимірюється тахогенератором і перетворюється аналого-цифровим перетворювачем в цифровий сигнал. Струм якоря вимірюється в аналоговій формі і потім перетворюється в цифровий код. За допомогою мікропроцесора можна розрахувати для кожної тривалості імпульсу середнє значення постійного струму і швидкість зростання струму в ланцюзі якоря, амплітудні значення струму можуть бути записані в пам'ять. У функції цих величин обчислюються керуючі імпульси для перетворювача. Синхронізуюча напруга отримується безпосередньо від мережі живлення за допомогою фільтра або ж мікропроцесор за заздалегідь складеною таблицею, що зберігається в його запам'ятовуючому пристрої, обчислює значення періодичного сигналу, напруга, частота і фаза якого порівнюються з напругою, частотою і фазою мережі. При цьому деформація напруги мережі вже не впливає на роботу перетворювача.

Для досліджень використовувався стенд (рис. 1), що був створений раніше [7].

Опис характеристик та функцій компонентів стенду: 1 – мікроконтролер, реалізований на базі мікропроцесору ADuC841; 2 – двигун постійного струму LEGO NXT, оснащений інтегрованим редуктором і інкрементним енкодером; 3 – понижувальний редуктор з передавальним відношенням 1:3; 4 – пружинний елемент – металева кручена пружина, що створює коливання в двомасовій системі; 5 – чотири вентилятора, що являють собою момент опору; 6 – виконавчий механізм, представлений металевою пластиною, що має

отвори для болтів M10; 7 – інкрементний енкодер другої маси.; 8 – плата аналогового вводу-виводу PC1-1711U; 9 – блок індикації – пристрій відображення даних, що складається з двох семисегментних індикаторів і LCD монітора, що має поле 16×2 символів; 10 – плата керування вентиляторами; 11 – потенціометр, яким подається сигнал завдання по положенню  $\varphi_{23}$  за допомогою АЦП.

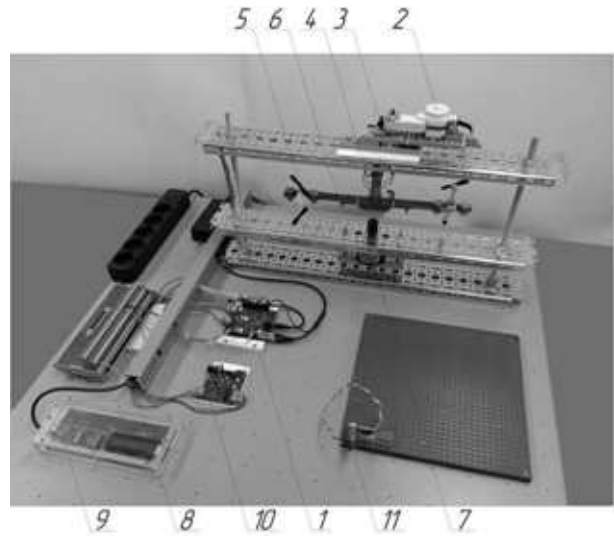


Рис. 1. Фото лабораторного стенду

В залежності від алгоритму керування системи автоматичного керування можна поділити на три категорії: розімкнуті, замкнуті та комбіновані [8]. Керування розімкненою системою здійснюється без контролю результату, тобто без зворотного зв'язку. В замкнутих системах керуючий вплив здійснюється навпаки, в безпосередній залежності від керованої величини. Комбіновані системи являють собою сукупність двох систем.

Для повороту другої маси на заданий кут була розроблена замкнута система керування по відхиленню, де перша маса керується слідкуючим приводом, а друга маса – позиційним. Головною особливістю слідкуючої системи являється можливість відпрацювання невідомого змінного вхідного сигналу, на відміну від позиційної системи, котра рухається по заданій, раніше відомій траєкторії. Тому задачею позиційної системи є формування змінного впливу, що задається, який забезпечить поворот другої маси на заданий кут. Цей вплив подається на вхід слідкуючої системи і відпрацьовується першою масою з урахуванням впливу, який збурює, що обумовлено пружними властивостями пружини, яка з'єднує вихідний вал двигуна і виконавчий механізм. Структурна схема системи наведена на рис. 2.

Слідкуюча система першої маси дозволяє, із заданою точністю і швидкодією, відпрацювати змінну дію, що задається, яким є кут повороту двигуна. Необхідні точність і швидкодія приводу досягаються за рахунок програмної реалізації системи управління на базі мікроконтролера ADuC841, а також наявністю від'ємного зворотного зв'язку по куту повороту. Була використана мова програмування С.

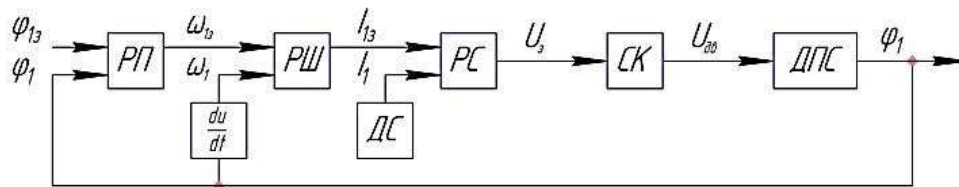


Рис. 2. Структурна схема слідкующего электропривода

ПП – регулятор положения; РШ – регулятор швидкості; РС – регулятор струму; ДС – давач струму;  
СК – силовий комутатор; ДПС – двигун постійного струму LEGO NXT.

*Синтез регулятора двомасової системи позиційного електроприводу.* Рух двомасової системи представлений таким рівнянням [8]:

$$M_{12} - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \quad (1)$$

де  $M_{12}$  – пружний момент;  $M_c$  – момент опору;  
 $J_2 = 0,0032432$  – момент інерції другої маси [8];  
 $\omega_2$  – кутова швидкість другої маси.

У свою чергу  $\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt}$ , значить  $\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}$ .

Пружний момент представлений наступною формулою:

$$M_{12} = c(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2)$$

де  $c$  – жорсткість пружної ланки;  
 $\varphi_1, \varphi_2$  – кути повороту першої та другої мас.

Далі, представивши формулу (1) з урахуванням формули (2), отримується:

$$\begin{aligned} c(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \\ c(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c &= J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}, \\ \frac{c\Delta\varphi - M_c}{J_2} &= \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Дослідним шляхом були розраховані коефіцієнти в'язкого тертя  $K_{в.тер.}$  та жорсткості пружної ланки  $c$ . Визначення коефіцієнта жорсткості здійснювалося шляхом знаходження періоду коливань другої маси  $\varphi_2$  при повороті першої маси  $\varphi_1$  на відомий кут.

По графіку був визначений період  $T$  коливань другої маси  $\varphi_2$ . Далі була використана формула періоду крутильних коливань: [9]

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_2}{c}}. \quad (4)$$

Знаючи момент інерції та період, була визначена жорсткість пружної ланки  $c = 0,008$ .

Визначення коефіцієнту в'язкого тертя здійснювалося шляхом моделювання затухання аналогічного тому, який був знятий на фізичному об'єкті.

$$K_{в.тер.} = 0,0002.$$

Для створення математичної моделі двомасової системи позиційного приводу була використана знайдена в попередній роботі передавальна функція апериодичної ланки 1 порядку  $W(s) = 1 / (0,2s + 1)$  слідкующего приводу першої маси [10].

Отримавши диференціальне рівняння руху двомасової системи 4, передавальну функцію слідкующего приводу та знайшовши коефіцієнти в'язкого тертя та жорсткості пружної ланки, була створена імітаційна модель позиційного приводу.

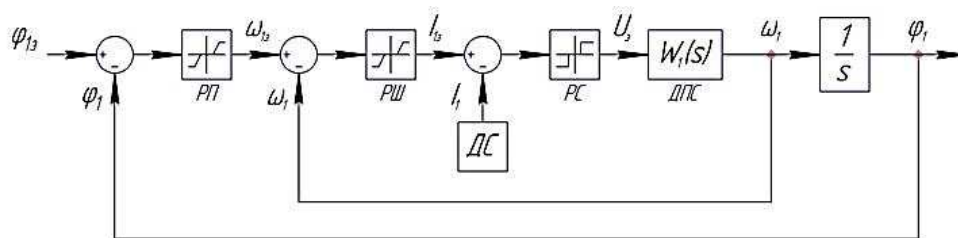


Рис. 3. Функціональна схема слідкующего электропривода

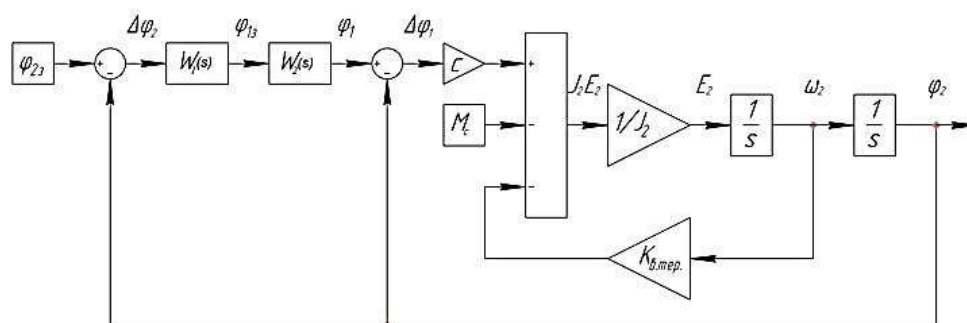


Рис. 4. Математична модель двомасової системи позиційного електроприводу

На рисунку 4 використовуються такі умовні позначення:

$W_1(s)$  – передавальна функція регулятора положення другої маси;

$W_2(s)$  – передавальна функція слідкуючого електроприводу;

$M_c$  – момент опору;

$c$  – жорсткість пружної ланки;

$K_{в.тер.}$  – коефіцієнт в'язкого тертя.

Для синтезу регулятора, який би зміг протидіяти моменту опору  $M_c$ , математична модель була перетворена наступним чином: замість завдання по положенню другої маси  $\varphi_{23}$ , на вхід системи подається момент опору  $M_c$ .

Дана схема описана такою передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{\varphi_2}{-M_c} = \frac{-1}{J_2 s^2 + K_{в.тер.} s + c W(s)_1 W(s)_2 + c}. \quad (5)$$

З цієї функції була виведена передавальна функція регулятора положення другої маси:

$$W(s)_1 = -\frac{J_2 s^2 + K_{в.тер.} s + c + 1/W(s)_2}{c W(s)_2}. \quad (6)$$

Для отримання передавальної функції регулятора положення другої маси необхідно було знайти бажану функцію всього контуру положення другої маси  $W(s)_{баж.}$ .

Системи, яким потрібна висока швидкість і мінімальне перерегулювання, називають системами з аперіодичною реакцією. Дані вимоги підходять для вирішення поставлених задач перед системою, тому бажана передавальна функція повинна мати аперіодичну реакцію, як показано в формулі 7 [11]:

$$W(s)_{баж.} = \frac{\omega_n^3}{\alpha \omega_n s^2 + \omega_n^2 s + \omega_n^3}, \quad (7)$$

де  $\omega = 4,82/T_s$  – власна частота;

$T_s = 5$  с – час встановлення;

$\alpha = 1,9$  – коефіцієнт при якому система має аперіодичну реакцію.

Після підстановки коефіцієнтів, бажана функція має вид:

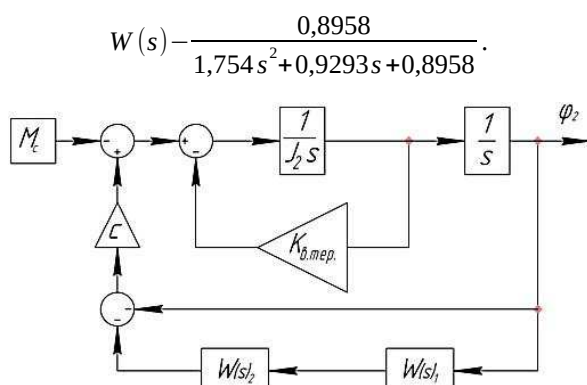


Рис. 5. Перетворена математична модель позиційного приводу з вхідним сигналом  $M_c$

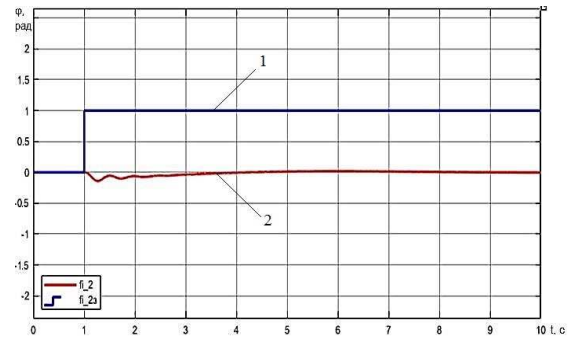


Рис. 6. Перехідні процеси при ступінчатому завданні по положенню  $\varphi_{23}$ , де 1 - завдання по положенню  $\varphi_{23}$ , 2 - положення другої маси  $\varphi_2$

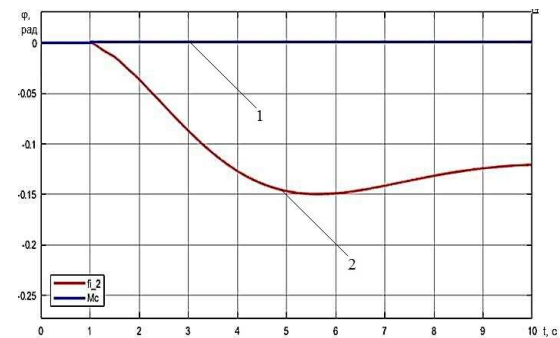


Рис. 7. Перехідні процеси при прикладенні моменту опору  $M_c$ , де 1 – момент опору  $M_c$ , 2 – положення другої маси  $\varphi_2$

Передавальна функція регулятора знайдена шляхом еквівалентних перетворень з метою забезпечення бажаної передавальної функції (8) контуру положення. Отримана функція регулятора має вигляд

$$W(s) = \frac{310,5 s^3 + 1755 s^2 + 1012 s}{s^3 + 30 s^2 + 300 s + 1000}. \quad (9)$$

Дану передавальну функцію було підставлено в основну модель, та знято перехідні процеси вихідного сигналу  $\varphi_2$  при прикладенні моменту опору  $M_c$  та завдання по положенню другої маси  $\varphi_{23}$ .

Даний регулятор складний в реалізації, не справляється ні з моментом опору  $M_c$ , ні з завданням по положенню  $\varphi_{23}$ , а тому його використання не доцільно.

**Розробка дискретного фільтра.** Перед розробкою ПІД-регулятора було прийнято рішення створити дискретний фільтр для сигналу завдання по положенню другої маси  $\varphi_{23}$ , завдяки якому на вхід регулятора буде потрапляти не стрибкоподібний сигнал, а трохи згладжений, що дозволить виключити різкі стрибки та сильне розгойдування другої маси.

Дискретний фільтр можна описати аперіодичною ланкою 1 порядку, а для програмної реалізації наступними формулами:

$$PF = PF + \varphi_{23} - VF, \quad (10)$$

де  $PF$  – пам'ять фільтра;

$\varphi_{23}$  – завдання по положенню другої маси;

$VF$  – вихід фільтра, що дорівнює:

$$VF = PF / KF, \quad (11)$$

де  $KF = 512$  – коефіцієнт фільтра.

Даний фільтр був програмно реалізований мовою С. На рис. 8 показаний його графік роботи, знятий за допомогою осцилографа.

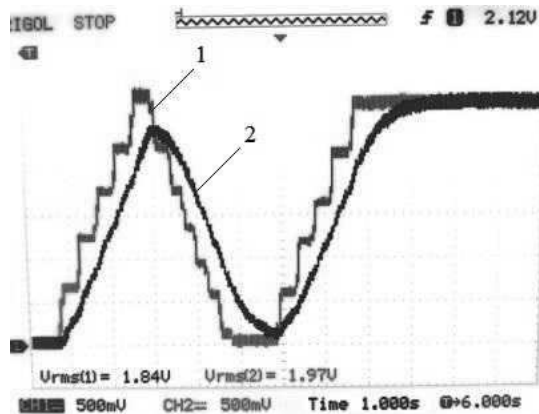


Рис. 8. Графік роботи дискретного фільтра, де 1 – вхідний сигнал, 2 – вихідний сигнал

**Розробка ПІД регулятора та його попереднє налаштування.** ПІД-регулятором називається пристрій, що застосовується в контурах керування, оснащених ланцюгом зворотного зв'язку. Дані регулятори використовують для формування сигналу керування в автоматичних системах, де потрібно досягти високих вимог до якості й точності перехідних процесів [12].

Керуючий сигнал ПІД-регулятора отримується в результаті складання трьох складових: перша пропорційна величині сигналу неузгодженості, друга – інтегралу сигналу неузгодженості, третя – його похідній [13].

ПІД-регулятор описується формулою:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (12)$$

де  $u(t)$  – вихідний сигнал;  
 $P$  – пропорційна складова;  
 $I$  – інтегральна складова;  
 $D$  – диференціальна складова;  
 $e(t)$  – поточна помилка;  
 $K_p$  – пропорційний коефіцієнт;  
 $K_i$  – інтегральний коефіцієнт;  
 $K_d$  – диференціальний коефіцієнт;

Для програмної реалізації, дана формула була перетворена в наступні:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t), \quad (13)$$

$$P(t) = K_p \cdot e(t), \quad (14)$$

$$I(t) = I(t-1) + K_i \cdot e(t), \quad (15)$$

$$D(t) = K_d \cdot [e(t) - e(t-1)]. \quad (16)$$

Створивши програмно ПІД-регулятор мовою С, із частотою роботи 0,05 с., було зроблене його попереднє налаштування [14]. Спочатку були вимкнені інтегральна та диференціальна складові, та підбирався пропорційний коефіцієнт. На рис. 9 показано декілька прикладів графіків вихідних сигналів при подачі завдання повороту другої маси на кут  $180^\circ$ , в залежності від пропорційного коефіцієнта  $K_p$ .

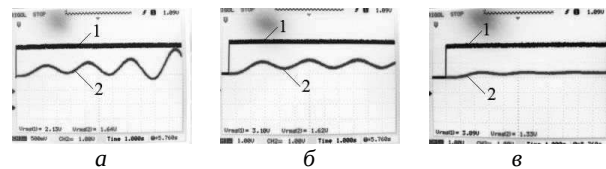


Рис. 9. Графіки вихідного сигналу системи  $\varphi_2$  при подачі завдання  $\varphi_{23}$  в залежності від пропорційного коефіцієнта  $K_p$  регулятора: а)  $K_p = 1/2$ , б)  $K_p = 1/3$ , в)  $K_p = 1/8$ , де 1 – завдання по положенню, 2 – положення другої маси

Як видно по графіках,  $K_p = 1/2$  – занадто великий коефіцієнт, бо система стає нестійкою,  $K_p = 1/8$  – занадто малий коефіцієнт, так як система має низьку швидкість. Тому  $K_p = 1/3$  є кращим варіантом, бо система має достатню швидкість і є стійкою.

Отже у всіх розглянутих вище випадках сталі значення сигналу на виході системи  $\varphi_2$  не збігаються із значенням завдання по положенню другої маси  $\varphi_{23}$ .

Чим менше коефіцієнт пропорційності, тим більше залишкова неузгодженість та більша тривалість перехідного процесу.

Наступним кроком було знаходження диференціальної складової. На рис. 10 показано декілька прикладів графіків вихідних сигналів з регулятора в залежності від диференціального коефіцієнта  $K_d$ .

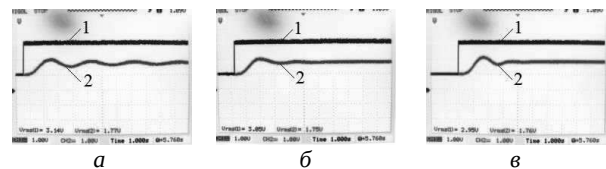


Рис. 10. Графіки вихідного сигналу системи  $\varphi_2$  при подачі завдання  $\varphi_{23}$  в залежності від диференціального коефіцієнта  $K_d$  регулятора: а –  $K_d = 4$ , б –  $K_d = 7$ , в –  $K_d = 12$ , де 1 – завдання по положенню, 2 – положення другої маси

Як видно по графіках,  $K_d = 4$  – занадто малий коефіцієнт, так повільно усуваються коливання,  $K_d = 12$  – занадто великий коефіцієнт, бо з'являється перерегулювання. Тому,  $K_d = 7$  є кращим варіантом.

Отже диференціальна складова усуває коливання та збільшує динамічну точність регулювання, але не усуває різницю неузгодженості між завданням по положенню  $\varphi_{23}$  та фактичним положенням об'єкта  $\varphi_2$ . Для цього була знайдена інтегральна складова.

Вона накопичує помилку  $\Delta\varphi_2$ , наповнюється, і тим самим посилює свій вплив. На рис. 11 показано декілька прикладів графіків вихідних сигналів з регулятора, в залежності від інтегрального коефіцієнта  $K_i$ .

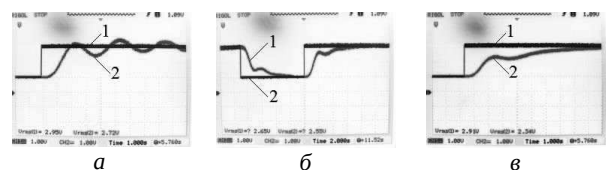


Рис. 11. Графіки вихідного сигналу системи  $\varphi_2$  при подачі завдання  $\varphi_{23}$  в залежності від інтегрального коефіцієнта  $K_i$  регулятора: а –  $K_i = 1/20$ , б –  $K_i = 1/56$ , в –  $K_i = 1/80$ , де 1 – завдання по положенню, 2 – положення другої маси

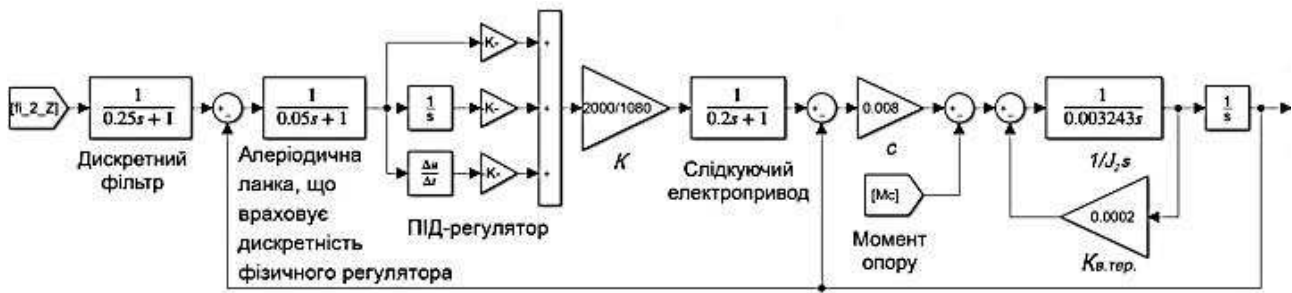


Рис. 12. Оновлена математична модель позиційного електроприводу двомасової системи

Як видно по графікам,  $K_i = 1/20$  – завеликий коефіцієнт, бо створює автоколивання, а  $K_i = 1/80$  – замалий, бо робить перехідний процес повільним.

Тому  $K_i = 1/56$  є кращім варіантом. Час перехідного процесу складає 8 с.

**Остаточне налаштування ПІД-регулятора за допомогою математичної моделі позиційного електроприводу.** Математична модель, що показана на рис. 4, була перетворена наступним чином. Був доданий дискретний фільтр, описаний аперіодичною ланкою:  $1/(0.25s+1)$ , ПІД-регулятор, аперіодична ланка, що враховує дискретність фізичного регулятора  $1/(0.05s+1)$ , та розрахований коефіцієнт, що дозволяє використовувати налаштування програмованого ПІД-регулятора на фізичному об'єкті у регуляторі, створеному в математичній середі MatLab / Simulink.

Коефіцієнт дорівнює:  $K = 2000 / 1080$ , де 2000 – кількість імпульсів енкодера другої маси напівоберт; 1080 – кількість імпульсів енкодера першої маси напівоберт, враховуючи редуктор.

Використовуючи дану математичну модель, були знайдені нові коефіцієнти ПІД-регулятора:  $K_p = 1/2$ ,  $K_i = 1/37$ ,  $K_d = 10$  та впроваджені у фізичну модель.

На рисунку 13 показані графіки відпрацювання позиційним приводом сигналу завдання. Графіки перехідних процесів дуже схожі, а отже розроблена математична модель адекватна. Час перехідного часу став дорівнювати 4 с., що у 2 рази швидше ніж при попередньому налаштуванні.

На рисунку 14 показані графіки перехідних процесів положення першої  $\varphi_1$  та другої  $\varphi_2$  мас. На них можна побачити, як двигун відпрацьовує завдання  $\varphi_{13}$  з ПІД-регулятора. По графіках видно, що двигун фізичного об'єкту має певні обмеження і не встигає відпрацьовувати завдання з ПІД-регулятора  $\varphi_{13}$ , як двигун математичної моделі. Далі була зроблена перевірка на спроможність системи чинити опір впливу, що збурює, у вигляді 4 вентиляторів, які показано на рисунку 1 п. 5.

Щоб показати дію моменту опору  $M_c$  на систему, на рис. 15 показано графік вихідного сигналу положення другої маси  $\varphi_2$  фізичного об'єкта при вимкненому двигуні та при прикладенні  $M_c$ .

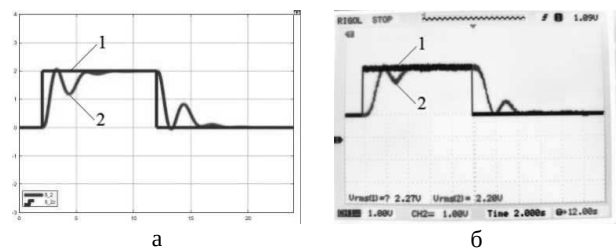
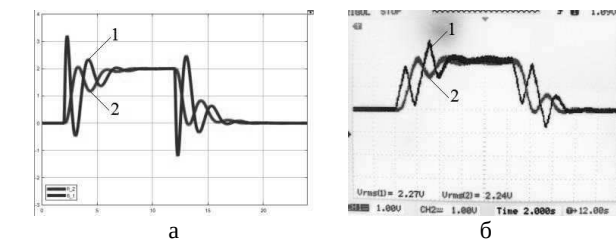
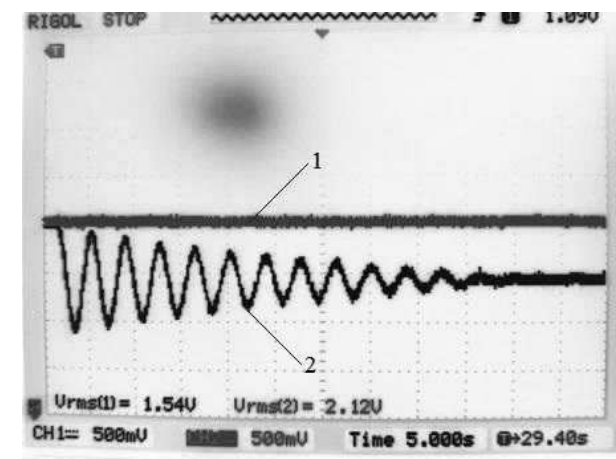
За рис. 15 був визначений момент опору  $M_c$ , що утворюють вентилятори:

$$M_c = c \cdot 1,658, \quad (17)$$

де  $c = 0,008$  – це жорсткість пружної ланки;

1,658 рад. – відхил  $95^\circ \varphi_1$  від  $\varphi_2$  при прикладенні моменту опору  $M_c = 0,0133$ .

На рис. 16 показані графіки перехідних процесів вже при ввімкненому двигуні та при прикладенні моменту опору  $M_c$ . Як видно, завдяки даному регулятору, задане положення відновлюється приблизно за 2 с.

Рис. 13. Графіки сигналу положення другої маси  $\varphi_2$  відносно завдання  $\varphi_{23}$ : а - математичної і б - фізичної моделі, де 1 - завдання по положенню, 2 - положення другої масиРис. 14. Графіки перехідних процесів положення першої  $\varphi_1$  та другої  $\varphi_2$  мас: а - математичної моделі і б - фізичної моделі, де 1 – положення першої та 2 - положення другої масиРис. 15. Графік сигналу положення другої маси  $\varphi_2$  при вимкненому двигуні та при прикладенні моменту опору  $M_c$ : де 1 - положення першої маси, 2 - положення другої маси

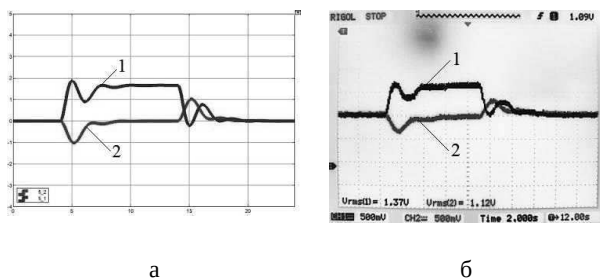


Рис. 16. Графіки перехідних процесів положення першої  $\varphi_1$  та другої  $\varphi_2$  мас при ввімкненому двигуні та при прикладенні Мс:  
а - математичної моделі, б - фізичної моделі,  
де 1 - положення першої маси, 2 - положення другої маси

**Висновки.** Використання слідкуючого одномасового електроприводу у внутрішньому контурі позиційного двомасового електроприводу дозволяє спростити синтез регулятора і зменшити необхідну обчислювальну потужність при моделюванні за рахунок представлення слідкуючого електроприводу аперіодичною ланкою першого порядку.

Розроблена імітаційна модель позиційного приводу, адекватність якої підтверджується фізичним експериментом, разом зі стендом може використовуватись при дослідженні замкнутих двомасових систем електроприводу постійного струму з мікропроцесорним керуванням.

Регулятор, синтезований класичним методом, має низьку практичну цінність у зв'язку зі складністю його реалізації, яка обумовлена високим порядком поліному чисельника передавальної функції.

Використання математичної моделі при практичному методі пошуку значень коефіцієнтів ПІД-регулятора, що забезпечують бажані статичні та динамічні характеристики системи, скорочує час пошуку та зменшує ризики пошкодження реального обладнання у процесі налагодження.

Подальші дослідження планується вести у напрямку збільшення швидкодії системи як за рахунок покращення динамічних характеристик приводу, що слідкує, так і шляхом уточнення математичної моделі, що дозволить отримати більш точні значення коефіцієнтів ПІД-регулятора.

#### Список литературы

1. Олейников М. О. Дослідження позиційного електроприводу з релейним регулятором струму. Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі знань «Електротехніка та електромеханіка» 16-18 квітня 2018 р.: тези доповідей. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С. 13 – 14.
2. Назарова О. С., Олейников М. О. Дослідження позиційного електроприводу з релейним регулятором струму. 45-а Міжнародна науково-технічна конференція молоді ПАТ «Запоріжсталь» 17 – 19 жовтня 2018 р.: тези доповідей. Запоріжжя: ПАТ «Запоріжсталь», 2018. С. 75 – 76.
3. Осадчий В. В., Назарова О. С., Олейников М. О. Дослідження позиційного електроприводу з релейним регулятором струму. Тиждень науки: Тези доповідей Щорічної наук.-практ. конф. викладачів, науковців, мол. учених, асп. та студ. 16-20 квітня 2018 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. С. 491 – 492.
4. PID-управление. URL: [https://studopedia.su/1\\_22688\\_PID---upravlenie.html](https://studopedia.su/1_22688_PID---upravlenie.html). (дата звернення 17.05.2019).

5. Позиционный электропривод. URL: <https://www.ngpedia.ru/id613967p1.html>. (дата звернення 17.05.2019).
6. Машиностроение: энциклопедия. В 40 т. Т. 4-3: Надежность машин / В. В. Ключев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин. Москва: Машиностроение, 2003. 592 с.
7. Осадчий В. В., Назарова Е. С., Брылистый В. В., Савилов Р. И. Лабораторный стенд для исследования микропроцессорных систем управления двухмассовым электроприводом. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ: Наука та техніка. 2016, № 22(98). С. 33 – 38.
8. Осадчий В. В., Назарова Е. С., Брылистый В. В., Савилов Р. И. Исследование системы управления позиционным электроприводом с дискретным датчиком положения. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силов електроніка і енергоефективність. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, Вип. 27 (1249). С. 146 – 149.
9. Определение моментов инерции методом крутильных колебаний. URL: [https://aipe-nv.ru/student/student\\_news/virtualnye\\_laboratornye\\_raboty/lab/lab39/mtd.htm](https://aipe-nv.ru/student/student_news/virtualnye_laboratornye_raboty/lab/lab39/mtd.htm). (дата звернення 17.05.2019).
10. Osadchii V. V., Nazarova O. S., Oleinikov M. O. Investigation of positional automatic control system with relay current regulator. *Actual Problems of Automation and Control: Conference materials on the VI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 30 November 2018*. Lutsk: LNTU, 2018, № 6. pp. 66 – 72.
11. Бишоп Р., Дорф Р. *Современные системы управления* / пер. с англ. Б. И. Копылова. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
12. Что такое ПИД-регулятор. URL: <http://elektrik.info/main/automation/1289-cto-takoe-pid-regulyator.html>. (дата звернення 17.05.2019).
13. Дискретный ПИД регулятор. URL: <http://robot-develop.org/archives/2833>. (дата звернення 17.05.2019).
14. Настройка ПИД регулятора. URL: [http://www.asu-tp.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=142&Itemid=68](http://www.asu-tp.org/index.php?option=com_content&task=view&id=142&Itemid=68). (дата звернення 17.05.2019).

#### References (transliterated)

1. Oleinikov M. O. Doslidzhennia pozysiinoho elektropriyvodu z releynym rehuliatorom strumu [Investigation of positional electric drive with relay current regulator]. *Vseukrainskyi konkurs studentskykh naukovykh robіt z haluzi znan «Elektrotehnika ta elektromekhanika» 16-18 kvitnia 2018 r.: tezy dopovidei* [All-Ukrainian competition of student scientific works in the field of knowledge "Electrical Engineering and Electromechanics" April 16-18, 2018: Abstracts]. Kamianske: DDTU, 2018. pp. 13 – 14.
2. Nazarova O. S., Oleinikov M. O. Doslidzhennia pozysiinoho elektropriyvodu z releynym rehuliatorom strumu [Investigation of positional electric drive with relay current regulator]. *45-a Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia molodi PAT «Zaporizhstal» 17 – 19 zhovtnia 2018 r.: tezy dopovidei* [45th International Scientific and Technical Conference of Youth of PJSC "Zaporizhstal" October 17 - 19, 2018: Abstracts]. Zaporizhzhia: PAT «Zaporizhstal», 2018. pp. 75 – 76.
3. Osadchii V. V., Nazarova O. S., Oleinikov M. O. Doslidzhennia pozysiinoho elektropriyvodu z releynym rehuliatorom strumu [Investigation of positional electric drive with relay current regulator]. *Tyzhden nauky: Tezy dopovidei Shchorichnoi nauk.-prakt. konf. vykladachiv, naukovtsiv, mol. uchenykh, asp. ta stud. 16-20 kvitnia 2018 r., Zaporizhzhia* [Science Week: Abstracts of the Annual Scientific and Practical Conference teachers, scientists, young scientists, postgraduate students and students 16-20 april 2018]. Zaporizhzhia: ZNTU, 2018. pp. 491 – 492.
4. PID-upravlenie [PID-control]. URL: [https://studopedia.su/1\\_22688\\_PID---upravlenie.html](https://studopedia.su/1_22688_PID---upravlenie.html). (accessed 17.05.2019).
5. Pозиційний електропривод [Positional electric drive]. URL: <https://www.ngpedia.ru/id613967p1.html>. (accessed 17.05.2019).
6. *Mashinostroenie: enciklopediya* [Engineering]. V 40 t. T. 4-3: *Nadezhnost' mashin* [Machine reliability] / V. V. Klyuev, V. V. Bolotin, F. R. Sosnin. Moskva: Mashinostroenie, 2003. 592 p.
7. Osadchii V. V., Nazarova E. S., Brylisty V. V., Savilov R. I. *Laboratornyy stend dlya issledovaniya mikroprocessornykh sistem upravleniya dvuhmassovym elektropriivodom* [Laboratory stand for researching of microprocessor control systems of dual-mass electric



- drive]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy* [Electrotechnic and computer systems]. Kyiv: Nauka ta tekhnika. 2016, № 22(98). pp. 33 – 38.
8. Osadchij V. V., Nazarova E. S., Brylistyj V. V., Savilov R. I. Issledovanie sistemy upravleniya pozicionnym elektroprivodom s diskretnym datchikom polozheniya [Investigation of the position electric drive control system with a discrete position sensor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. Ser.: *Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriya i praktyka. Sylova elektronika i enerhoefektyvnist* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice. Power Electronics and Energy Efficiency]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, Vyp. 27 (1249). pp. 146 – 149.
  9. *Opreделение momentov inercii metodom krutilnih kolebanij* [The determination of the moments of inertia by the method of torsional vibrations]. URL: [https://aipe-nv.ru/student/student\\_news/virtualnye\\_laboratornye\\_raboty/lab/lab39/mtd.htm](https://aipe-nv.ru/student/student_news/virtualnye_laboratornye_raboty/lab/lab39/mtd.htm). (accessed 17.05.2019).
  10. Osadchii V. V., Nazarova O. S., Oleinikov M. O. Investigation of positional automatic control system with relay current regulator. Actual Problems of Automation and Control: Conference materials on the VI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 30 November 2018. Lutsk: LNTU, 2018, № 6. pp. 66 – 72.
  11. Bishop R., Dorf R. *Sovremennye sistemy upravleniya* [Modern control systems] / per. s angl. B. I. Kopylova. Moskva: Laboratoriya Bazovyh Znanij, 2002. 832 p.
  12. *CHto takoe PID-regulyator* [What is a PID controller]. URL: <http://elektrik.info/main/automation/1289-cto-takoe-pid-regulyator.html>. (accessed 17.05.2019).
  13. *Diskretnyj PID regulyator* [Discrete PID Controller]. URL: <http://robot-develop.org/archives/2833>. (accessed 17.05.2019).
  14. *Nastrojka PID regulyatora* [PID Control Setting]. URL: [http://www.asu-tp.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=142&Itemid=68](http://www.asu-tp.org/index.php?option=com_content&task=view&id=142&Itemid=68). (accessed 17.05.2019).

Поступила 20.06.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Осадчий Володимир Володимирович (Осадчий Владимир Владимирович, Osadchyy Volodymyr Volodymyrovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; ORCID:0000-0002-2707-0805; e-mail: w.osadchiy@gmail.com

**Назарова Олена Сергіївна (Назарова Елена Сергеевна, Nazarova Olena Serhiivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: 0000-0002-0784-7621; e-mail: nazarova16@gmail.com

**Олейников Микола Олександрович (Олейников Николай Александрович, Oleinikov Mykola Oleksandrovych)** – Національний університет «Запорізька політехніка», студент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: www.nikolay-96@ukr.net